مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی رفتار باربری و نشست پی‌های دایره‌ای لبه‌دار نسبت به انواع پی‌ها*

سجاد قلی‌پور[۱]		مسعود مکارچیان[۲]

چکیده *پی‌های لبه‌دار در حال گسترش به‌عنوان نوع جدیدی از پی‌ها، جایگزین انواع پی‌های متداول در سازه‌های ساحلی و فراساحلی هستند. مطالعه‌ی عملکرد پی‌های لبه‌دار، با تمرکز بر ارزیابی تأثیر هندسه‌ی پی و مشخصات خاک ضروری است. در این پژوهش، ظرفیت باربری و نشست پی‌های دایره‌ای لبه‌دار واقع بر ماسه، تحت بارگذاری قائم فشاری توسط مدل‌سازی فیزیکی و تحلیل عددی با بررسی تأثیر پارامترهای مختلف شامل عمق لبه، قطر پی، چگالی ماسه و زبری سطوح پی مطالعه شد. عملکرد پی‌های لبه‌دار با سایر انواع پی‌های متداول سطحی، نیمه‌عمیق و سطحی مدفون مقایسه شد. تحلیل نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که رفتار مدل‌های پی لبه‌دار نسبت به پی‌های سطحی، به‌لحاظ افزایش مقادیر ظرفیت باربری و ضریب واکنش بستر و هم‌چنین کاهش میزان نشست، بهبود قابل‌توجهی داشته‌است. مقادیر بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار با افزایش میزان عمق لبه و زبری سطوح مدل‌ها و هم‌چنین کاهش چگالی نسبی ماسه، افزایش یافت. مقایسه‌ی نتایج ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار با مقادیر متناظر پی‌های نیمه‌عمیق نشان داد که رفتار باربری پی‌های لبه‌دار نزدیک به مقادیر متناظر پی‌های نیمه‌عمیق با عمق و قطر یکسان است. مقایسه‌ی عملکرد پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های سطحی مدفون، بیانگر کاهش بیشتر میزان نشست پی‌های سطحی به‌علت وجود لبه در زیر پی به‌جای مدفون کردن پی و هم‌چنین بهبود بیشتر ظرفیت باربری با افزایش میزان زبری سطوح لبه است.*

واژه‌های کلیدی پی لبه‌دار، مدل‌سازی فیزیکی، ظرفیت باربری، پی نیمه‌عمیق.

Experimental and Numerical Study of Load-Bearing and Settlement Behavior of Circular Skirted foundations Compared to other Types of Foundations

S. Gholipour		M. Makarchian

Abstract *Skirted foundations are expanding as a new type of alternative foundations for other prevalent foundations in onshore and offshore structures. The study of skirted foundations performance is essential for evaluating the effect of foundation geometry and soil specification. In this research, the bearing capacity and settlement of circular skirted foundations resting on sand under vertical compression loading was studied by physical modeling and numerical analysis with consideration of the effect of different parameters including skirt depth, foundation diameter, sand density and surface roughness of the foundation models. The performance of skirted foundations was compared with common types of surface, semi-deep and embedded foundations. Analysis of results showed that the behavior of skirted foundation models compared to the surface foundations has been improved significantly in terms of the enhancement in the values of bearing capacity and subgrade reaction modulus, as well as the reduction of settlement amounts. Improvement in the performance of skirted foundations was increased by increasing the skirt depth and surface roughness of models, and also, reducing the density of the sand. The comparison of the bearing capacity results of the skirted foundations with the corresponding values of the semi-deep foundations showed that the load- bearing behavior of the skirted foundations is close to those of semi-deep foundations with the same depth and diameter. Comparison of the skirted foundations performance relative to embedded surface foundations represents a further reduction in the settlement amounts of surface foundations due to the skirt existence underneath foundation instead of its embedment in depth, as well as the further improvement of bearing capacity by increasing the surface roughness of the skirt.*

Key Word Skirted foundation, Physical modelling, Bearing capacity, Semi-deep foundation.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۸/٦/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۱۰/۱۰ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموخته‌ی دکتری گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

(۲) نویسنده‌ی مسئول، استادیار گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان.

Email: makarchian@basu.ac.ir

مقدمه

در طراحی پی‌ها دو معیار اساسی مطرح است که عبارتند از رفتار ظرفیت باربری و نشست. انواع پی‌های متداول دربرگیرنده‌ی پی‌های سطحی، نیمه‌عمیق و عمیق هستند که به‌طور گسترده‌ای در سازه‌ها استفاده می‌شوند. ساخت سازه‌های بلندمرتبه و سنگین به‌صورت ایمن، نیازمند مقادیر باربری بیشتر و نشست کمتری است؛ عدم کفایت پی‌های سطحی، باعث بروز نگرانی در جامعه‌ی مهندسان شده‌است و برای برون‌رفت از مشکلات، به‌سمت استفاده از پی‌های عمیق و نیمه‌عمیق سوق یافته‌اند. پی‌های عمیق به‌دلیل اقناع ملزومات ظرفیت باربری و نشست در سازه‌های بزرگ، می‌توانند کاربرد فراوان داشته‌باشند، ولی وجود برخی مشکلات هم‌چون تجهیزات ساخت و نصب، هزینه‌ی زیاد اجرایی و زمان طولانی نصب، استفاده از پی‌های عمیق را محدود ساخته‌است. توسعه‌ی روش‌های جایگزین به‌منظور تقویت و تأمین ملزومات باربری و نشست پی‌های سطحی و هم‌چنین رفع محدودیت‌های اجرایی مرتبط با پی‌های عمیق، همواره مورد تأکید محققان بوده‌است، به‌همین منظور، روش‌های مختلف تقویت و به‌سازی پی‌های سطحی در دهه‌های گذشته توسعه یافته‌است [1-4].

استفاده از لبه برای تقویت سیستم پی و خاک به‌منظور افزایش میزان باربری و کاهش نشست پی‌های سطحی، مفهوم نسبتا جدیدی از روش‌های به‌سازی هم‌زمان خاک و پی، تحت عنوان پی‌های لبه‌دار (Skirted Foundations) است که در حال توسعه به‌منظور جایگزینی با سایر پی‌های سطحی، نیمه‌عمیق و عمیق هستند. پی‌های لبه‌دار، پی‌های سطحی تقویت‌شده با صفحات جدارنازک (لبه) مدفون در پیرامون هستند؛ به‌طوری‌که لبه‌ی محیطی با محصورسازی جانبی خاک ضعیف، باعث افزایش قابل‌توجه سختی خاک می‌شود و بارهای سازه را به لایه‌های مستحکم زیرین انتقال می‌دهد. عملیات نصب نسبتا آسان و زمان کوتاه آن، صرفه‌جویی اقتصادی قابل‌ملاحظه‌ای را درمقایسه با عملیات اجرایی شمع‌کوبی پی‌های عمیق فراهم می‌کند. پی‌های لبه‌دار به‌طور گسترده‌ای در سازه‌های ساحلی و فراساحلی به‌عنوان پی نیروگاه، سکوی حفاری، مخازن صنایع نفت، گاز و توربین بادی استفاده می‌شوند.

علی‌رغم مطالعات گسترده و وجود دانش کافی در ارتباط با معیارهای طراحی و اجرای پی‌های سطحی و عمیق [5-9]، هنوز تحقیقات کافی در مورد عملکرد و مکانیزم رفتاری پی‌های لبه‌دار انجام نشده‌است. باتوجه به کاربرد بیشتر پی‌های لبه‌دار در کنار دریا واقع بر خاک ریزدانه، بیشتر مطالعات بر رفتار زهکشی‌نشده متمرکز بوده‌است [10-13]، بااین‌حال، وجود پروژه‌های عمرانی گسترده در سواحل دریاها به‌ویژه خلیج‌فارس و نوع خاک دانه‌ای سواحل، مطالعه‌ی پی‌های لبه‌دار را در خاک‌های ماسه‌ای ضروری می‌سازد.

عملکرد پی‌های لبه‌دار واقع بر بستر خاک ماسه‌ای توسط محققان مختلف بررسی شده‌است که خلاصه‌ای از نتایج ارائه می‌شود:

رفتار انواع پی‌های سطحی واقع بر ماسه با بررسی تأثیر حضور لبه در زیر پی مطالعه شد. نتایج نشان داد که بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های سطحی به خصوصیات سازه‌ای و هندسی لبه و پی، مشخصات ماسه و شرایط سطوح تماس پی بستگی دارد [14-16]. مقایسه‌ی نتایج پاسخ بار دربرابر نفوذ برای پی‌های لبه‌دار نشان داد که روابط نظری، مقادیر ظرفیت باربری پی‌ها را به‌ازای زوایای اصطکاک داخلی حداکثر ماسه، دست‌بالا تخمین می‌زند [17]. تأثیر محصورشدگی خاک‌های دانه‌ای توسط استوانه‌های پلیمیری برروی مدل‌های پی دایره‌ای بررسی شد. افزایش نسبت ظرفیت باربری پی تا حدود ۱۷ برابر حالت بدون لبه و هم‌چنین عدم تأثیر عمق مدفون پی سطحی نسبت به تراز بالای استوانه به‌عنوان نتایج مطالعه گزارش شد [18]. نتایج بررسی تأثیر وجود لبه بر مقادیر باربری پی نواری نشان داد که لبه‌های

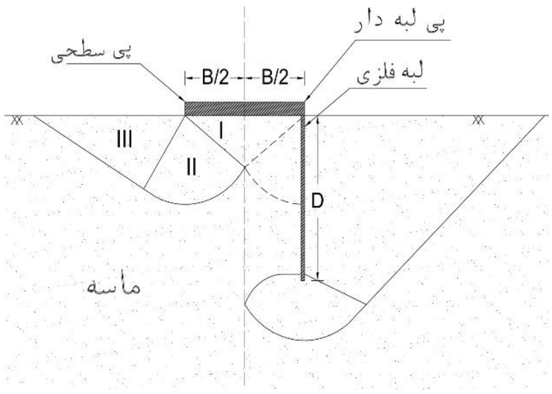
منعطف نسبت به حالت صلب، مقادیر بهبود ظرفیت باربری بیشتری را به‌دست می‌دهد [19]. اثر هم‌زمان محصورسازی جانبی خاک توسط لبه و تسلیح خاک با ژئوگرید نشان داد که استفاده‌ی هم‌زمان محصورسازی و تسلیح خاک، ظرفیت باربری نهایی پی سطحی را تا حدود ۲/۳ برابر نسبت به حالت بدون لایه‌ی ژئوگرید افزایش می‌دهد [20]. عملکرد ظرفیت باربری و نشست پی‌های مربعی واقع بر ماسه‌ی محصورشده به‌صورت جانبی و قائم بررسی شد. استفاده از دیواره‌های فلزی صلب در اطراف پی با عرض بزرگ‌تر از عرض پی سطحی و وجود بستر سنگی زیر پی منجر به بهبود قابل‌توجه رفتار پی‌های سطحی شد. [21-22]. مطالعه‌ی آزمایشگاهی برروی پی‌های لبه‌دار واقع بر ماسه، بهبود قابل‌توجه ظرفیت باربری این نوع پی‌ها را تا حدود ۵ برابر نشان داد [23]. بررسی تأثیر وجود لبه بر پایداری شیب‌های ماسه‌ای نشان داد که عملکرد کلی سیستم به‌لحاظ افزایش باربری و کاهش نشست بهبود قابل‌توجهی دارد. [24]. ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار، در صورت وجود تغییرشکل خاک نسبت به حالت صلب، کاهش می‌یابد. برخی از محققان، تأثیر وجود لبه‌های میانی بر رفتار باربری پی‌های لبه‌دار محیطی را مطالعه نمودند و فاصله‌ی بهینه‌ی لبه‌ها را به‌منظور جلوگیری از کاهش ظرفیت باربری به‌علت تغییرشکل خاک درون لبه، ارائه دادند [25-26].

برای پی‌های سطحی واقع بر خاک ماسه‌ای، ظرفیت باربری نهایی، q_{ult}، می‌تواند از رابطه‌ی نظری (۱) تخمین زده شود که در آن γ وزن واحد خاک، D_f عمق مدفون پی، N_q و N_γ ضرایب ظرفیت باربری بر پایه‌ی زاویه‌ی اصطکاک داخلی ماسه (φ)، s_q و s_γ ضرایب شکل، d_q و d ضرایب عمق و B عرض پی هستند [8]:

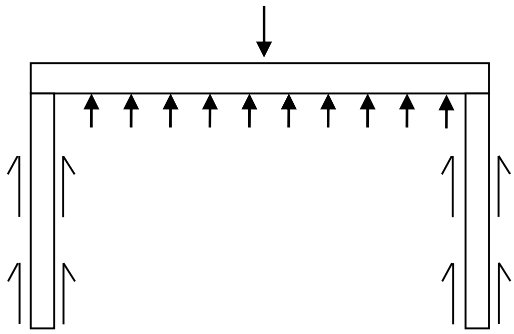
$$q_{ult} = \gamma D_f N_q s_q d_q + 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (۱)$$

با درنظرگیری پارامترهای ظرفیت باربری نهایی و تأثیر تنش سربار (γD_f) بر عملکرد پی‌های سطحی، ملاحظه می‌شود که افزایش تنش محصورکنندگی خاک و عمق مدفون پی، از عوامل مؤثر بر بهبود عملکرد پی‌ها است که تغییر مکانیزم گسیختگی و افزایش عمق مؤثر می‌تواند باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی شود. هم‌چنین براساس روش تعادل حدی، مقادیر ظرفیت باربری پی‌ها تناسب مستقیم با اندازه‌ی سطوح لغزش گوه‌های گسیختگی زیر پی دارد و از روش‌های افزایش سطوح گوه‌های گسیختگی، افزایش عرض پی یا عمق مدفون پی می‌باشد [27].

استفاده از لبه در زیر پی سطحی می‌تواند راه‌حل مناسبی برای مدفون کردن پی در تراز اعماق پایین‌تر خاک جهت افزایش عمق مؤثر پی‌های سطحی و تغییر سطوح لغزش گوه گسیختگی زیر پی باشد. نمای شماتیک مکانیزم و مرزهای سطوح گسیختگی برای پی‌های سطحی و لبه‌دار در شکل (۱) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که سطوح گسیختگی پی‌های سطحی به‌دلیل وجود لبه در زیر پی، تا نزدیک نوک لبه گسترش و اندازه‌ی سطوح گسیختگی افزایش یافته‌است. باتوجه به وجود لایه‌های متراکم در اعماق پایین‌تر زمین و افزایش مقادیر پارامترهای مقاومتی با افزایش عمق مؤثر، حضور لبه باعث انتقال بار از سطوح ضعیف خاک به بستر مقاوم، مشابه با مکانیزم انتقال بار پی‌های نیمه‌عمیق و عمیق می‌شود و نشست پی نیز کاهش می‌یابد. شکل (۲) جزئیات مکانیزم باربری و انتقال بار پی‌های لبه‌دار را که مشابه پی‌های عمیق و نیمه‌عمیق، شامل مجموع مقاومت‌های باربری کف پی و دیواره‌ی لبه است، نشان می‌دهد. بنابراین با افزایش عمق مؤثر پی از طریق حضور لبه، می‌توان از پی‌های لبه‌دار به‌منظور ارضای ملزومات باربری و نشست و هم‌چنین کاهش عمق مدفون و ابعاد پی سطحی، استفاده نمود.



شکل ۱ الگوی مکانیزم باربری و مرزهای سطوح گسیختگی پی‌های سطحی و لبه‌دار [22]



شکل ۲ مکانیزم باربری و انتقال بار پی‌های لبه‌دار [28]

باتوجه به مطالب ارائه‌شده درمورد پی‌های لبه‌دار شامل کاربرد، مزایا و اهمیت مطالعه‌ی رفتار و مکانیزم باربری این نوع پی‌ها و هم‌چنین وجود کاستی‌های موجود در تحقیقات مشابه قبلی، نیاز به بررسی و ارزیابی جامع‌تر، ضرورت دارد. مطالعه‌ی حاضر شامل برنامه‌ی گسترده‌ی عملیات آزمایشگاهی برروی مدل‌های کوچک‌مقیاس و تحلیل المان‌محدود برروی مدل‌های کوچک و بزرگ‌مقیاس پی دایره‌ای واقع بر ماسه‌ی محصور شده توسط لبه است. رفتار ظرفیت باربری، نشست و ضریب واکنش بستر پی‌های لبه‌دار با بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هندسه‌ی پی و مشخصات خاک شامل قطر پی (B)، عمق لبه (D)، نسبت عمق لبه به قطر پی (D/B)، زبری سطوح فصل مشترک پی و خاک (δ) و دانسیته‌ی نسبی ماسه (R_d) مورد ارزیابی قرار گرفت.

جزئیات و مقادیر پارامترهای ثابت و متغیر در مجموعه‌ی آزمایش‌ها، در جدول (۱) ارائه شده‌است. هم‌چنین نتایج بهبود رفتار پی‌های لبه‌دار به‌لحاظ افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست با مقادیر متناظر انواع پی‌های سطحی، نیمه‌عمیق و مدفون مقایسه شد. پژوهش حاضر نسبت به تحقیقات مشابه قبلی، در موارد ذیل که از جنبه‌های نوآوری تحقیق به‌شمار می‌روند، متمایز است:

۱. برآورد مقادیر ظرفیت باربری، نشست و ضریب واکنش بستر پی‌های لبه‌دار و مقایسه با نتایج پی‌های سطحی، نیمه‌عمیق و سطحی مدفون.
۲. شبیه سازی زبری‌های مختلف بر سطوح لبه و پی توسط کاغذ سنباده و بررسی تأثیر آن.

جدول ۱ جزئیات و مقادیر پارامترهای مورد مطالعه

سری آزمایش	پارامتر ثابت	پارامتر متغیر
الف	R_d= 0.64 δ= 29°	D/B= 0, 0.5, 1, 1.5, 2 B= 100, 75, 50 mm
ب	δ= 29°	D/B= 0, 0.5, 1, 1.5, 2 B= 100, 75 mm R_d= 0.5, 0.75
ج	R_d= 0.64	D/B= 0, 0.5, 1, 1.5, 2 B= 100, 75 mm δ= 34°, 37°

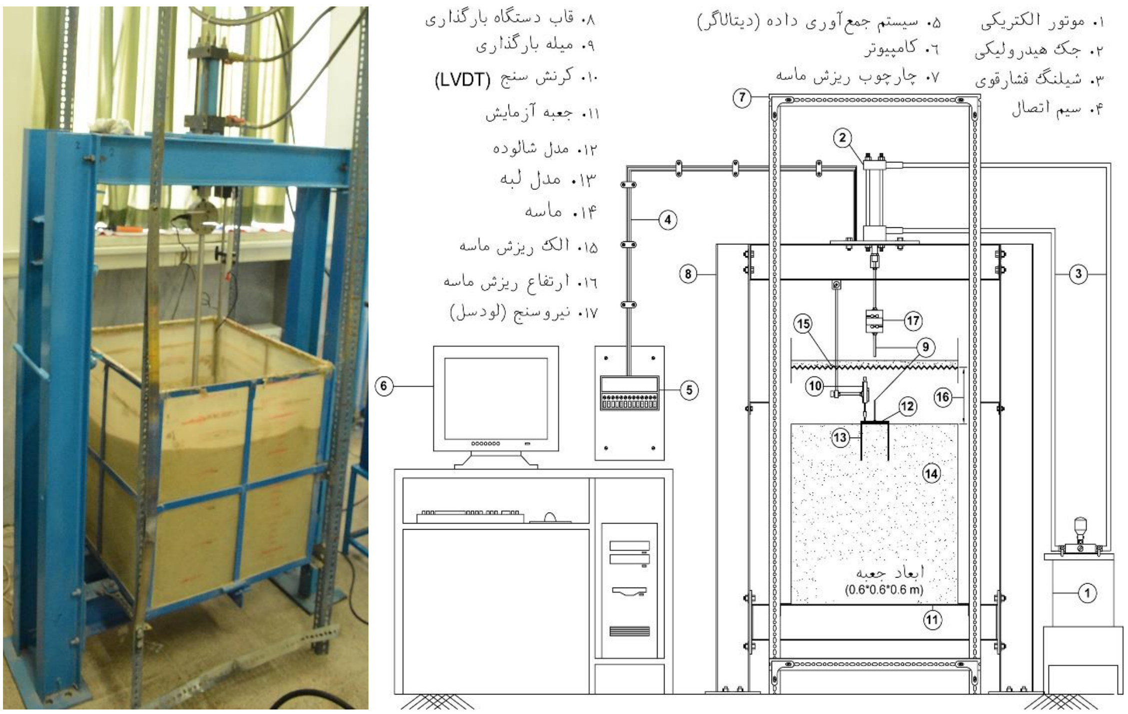
برنامه‌ی مدل‌سازی آزمایشگاهی

دستگاه آزمایش و مدل‌های پی

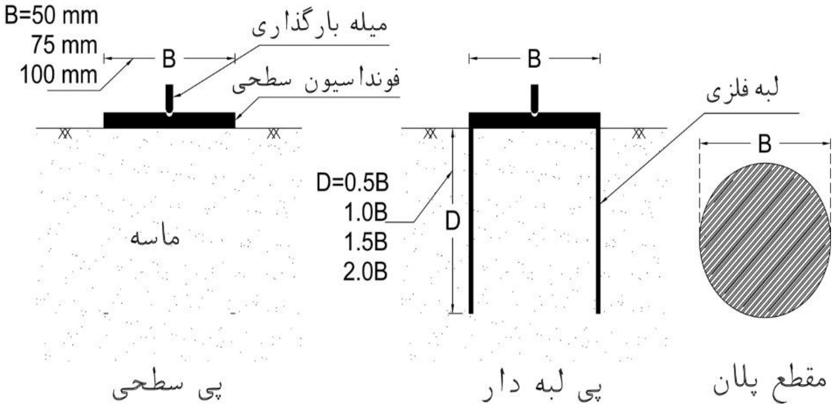
به‌منظور شبیه‌سازی فیزیکی رفتار پی‌های لبه‌دار واقع بر بستر ماسه، آزمایش‌های مدل‌های کوچک‌مقیاس پی توسط دستگاه آزمایشگاهی به ابعاد ۶۰×۶۰×۶۰ cm مطابق شکل (۳) انجام شد. به‌منظور نمونه‌سازی و تهیه‌ی بستر یکنواخت ماسه از سیستم ریزش ماسه (Sand raining) استفاده شده‌است. بارگذاری مدل‌های پی توسط جک هیدرولیکی با سرعت بارگذاری ۱ mm/min و از طریق میله‌ی بارگذاری در وسط به مدل پی انتقال یافت. از نیروسنج (Load cell) با ظرفیت بارگذاری ton

۲ و جابه‌جایی‌سنج با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ mm به‌منظور اندازه‌گیری پاسخ نیرو- نشست مدل‌های پی استفاده شد. هم‌چنین ثبت و انتقال داده‌ها از طریق دستگاه داده‌نگار (Data logger) ١٦ کاناله‌ی متصل به رایانه انجام گرفت. مدل‌های فولادی پی شامل فونداسیون سطحی به‌ضخامت ۱۳ mm و لبه به‌ضخامت جداره‌ی ۳ mm هستند که با اتصال لبه‌ی پیرامونی به فونداسیون سطحی توسط تعدادی پیچ، سیستم پی لبه‌دار تشکیل شد.

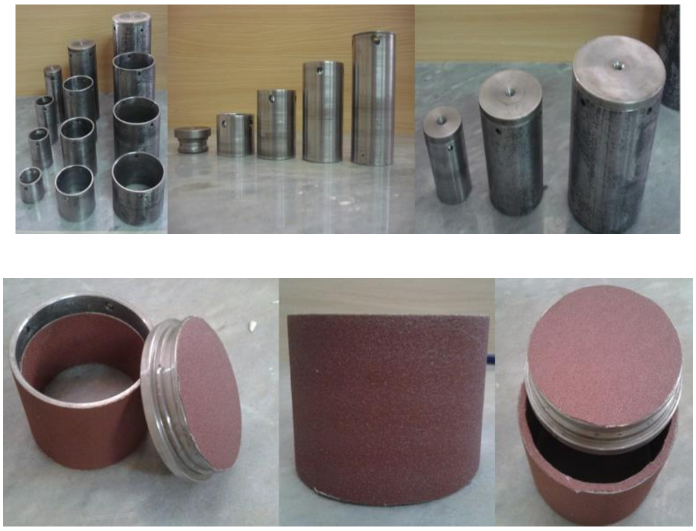
ابعاد مدل‌های پی براساس ابعاد مخزن آزمایش و با درنظرگیری عدم تأثیر احتمالی شرایط مرزی (شکل مخزن و فواصل مدل از جداره‌ی مخزن) بر نتایج انتخاب شد. در این پژوهش با درنظرگیری فواصل مناسب مدل‌های پی از جداره‌ی مخزن، تأثیر شکل مخزن و شرایط مرزی بر نتایج به حداقل می‌رسد و نمی‌تواند بر مقادیر و روند نتایج اثرگذاری مهمی داشته باشد. برمبنای تحلیل حساسیت صورت‌گرفته و استناد بر مراجع مرتبط [29-31]؛ حداقل فاصله‌ی پی تا جداره‌ی جعبه و زیر لبه تا کف جعبه بایستی به‌ترتیب $۲/۵B$ و $۳B$ باشد، سه نوع مدل پی با قطرهای ۵، ۷/۵ و ۱۰ cm مورد آزمایش قرار گرفت. برپایه‌ی اهداف پژوهش، مطابق شکل (٤)، چهار عمق مختلف لبه متناظر با نسبت‌های عمق لبه به قطر پی برابر با ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲، برای بررسی پارامتر نسبت عمق لبه و مقایسه با نتایج مدل‌های پی سطحی درنظر گرفته شد. باتوجه به میزان کم زبری سطوح مدل‌های پی، به‌منظور افزایش زبری سطوح مدل‌ها و بررسی تأثیر میزان آن بر نتایج، با چسباندن دو نوع کاغذ سنباده با میزان زبری‌های مختلف بر سطوح پی، مدل‌های پی با سطوح زبر ایجاد شد. شکل (۵) تصاویری از انواع مدل‌های پی با سطوح صاف و زبری مورد استفاده در مدل‌سازی فیزیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۳ تصاویری از دستگاه آزمایش مورد استفاده در مطالعه و جزئیات مختلف آن



شکل ٤ جزئیات مدل‌های آزمایشگاهی پی سطحی و لبه‌دار



شکل ٥ تصاویر مدل‌های پی لبه‌دار با ابعاد و زبری مختلف

مشخصات مصالح

ماسه‌ی سیلیسی فیروزکوه با نام SP [32] و مشخصات دانه‌بندی مطابق جدول (٢)، به‌عنوان خاک بستر زیر پی در برنامه‌ی عملیات آزمایشگاهی استفاده شد. آزمایش‌های مدل‌های فیزیکی با مدل‌سازی سه میزان دانسیته‌ی نسبی ماسه برابر با مقادیر ۰/٥، ۰/٦٤ و ۰/٧٥ انجام گرفت که به‌ترتیب متناظر با وزن‌های واحد ١٥/٩، ١٦/٣ و ١٦/٦ kN/m^3 هستند. به‌منظور رسیدن به مقادیر دانسیته‌ی نسبی موردنظر در آزمایش‌ها، از روش متداول ریزش ماسه با کنترل نرخ و ارتفاع ریزش ثابت، استفاده شد [33-35].

جدول ٢ مشخصات ماسه‌ی مورد استفاده در مدل‌سازی فیزیکی

پارامتر	مقادیر
نوع خاک (UCSC)	SP
ضریب یکنواختی (C_u)	١/٣١
ضریب انحنا (C_c)	١/٠٥
چگالی ویژه (G_s)	٢/٦١
وزن واحد خشک حداکثر	١٧/٤ kN/m^3
وزن واحد خشک حداقل	١٤/٦ kN/m^3

پارامترهای مقاومت برشی ماسه برحسب سه نوع دانسیته‌ی نسبی مورد مطالعه، توسط آزمایش‌های برش

مستقیم و سه‌محوری اندازه‌گیری شد. برای دانسیته‌های نسبی کمتر، مقادیر زوایای اصطکاک داخلی ماسه توسط هر دو آزمایش تقریبا یکسان به‌دست آمد. در حالت ماسه‌ی متراکم و دانسیته‌ی بیشتر، نتایج آزمایش برش مستقیم، حدود ۲ تا ٤ درجه بیشتر از نتایج متناظر آزمایش سه‌محوری مشاهده شد. براساس پوش گسیختگی، متوسط زوایای اصطکاک داخلی ماسه (φ) به‌ازای سه دانسیته‌ی نسبی ۰/۵، ۰/٦٤ و ۰/۷۵، به‌ترتیب برابر با ۳۸، ٤۱ و ٤۳ درجه به‌دست آمد. هم‌چنین برای اندازه‌گیری میزان زبری سطوح مدل‌ها، مقادیر زوایای اصطکاک سطوح فصل مشترک مدل‌های پی به‌ازای زبری‌های مختلف با ماسه (δ) توسط دستگاه آزمایش برش مستقیم برپایه‌ی دانسیته‌ی نسبی ۰/٦٤ تعیین شد. براساس نتایج منحنی‌های پوش گسیختگی، میزان زوایای اصطکاک سطوح فصل مشترک مدل‌های با زبری مختلف با ماسه به‌ازای دانسیته‌ی نسبی ۰/٦٤، به‌طور متوسط حدود ۲۹، ۳٤ و ۳۷ درجه به‌دست آمد.

نحوه‌ی مدل‌سازی و انجام آزمایش‌ها

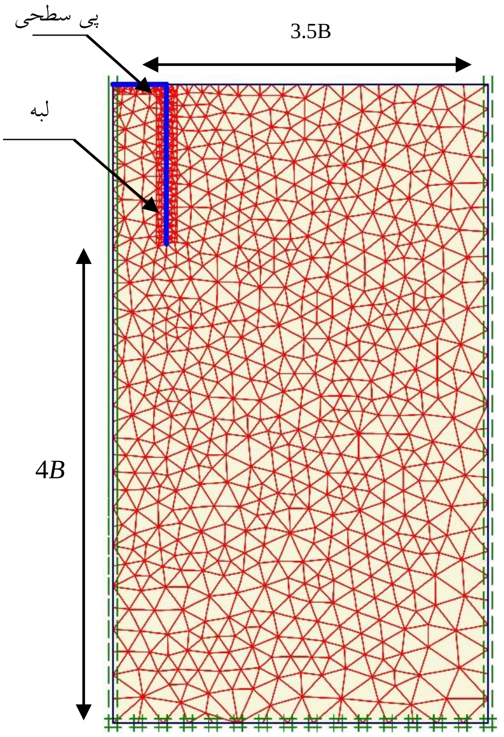
در فرایند مدل‌سازی فیزیکی، به‌منظور تهیه‌ی بستر یکنواخت و همگن ماسه از روش ریزش ماسه درون جعبه‌ی آزمایش استفاده شد. با انجام روغن‌کاری سطوح داخلی جعبه‌ی آزمایش به‌منظور کاهش تأثیر شرایط جداره بر نتایج مدل‌سازی، ماسه در لایه‌های ۵ سانتی‌متری از ارتفاع ثابت و نرخ ریزش یکنواخت به‌ازای‌ی دانسیته نسبی مشخص، ریخته شد. با تغییر ارتفاع و نرخ ریزش ماسه، میزان تراکم ماسه قابل تغییر است. در مراحل مختلف نمونه‌سازی، به‌منظور اطمینان از حصول دانسیته‌ی موردنظر، با قرار دادن ظروف با حجم مشخص در نقاط مختلف جعبه، مقادیر دانسیته‌ی ماسه و صحت نمونه‌سازی کنترل شد.

با ریزش ماسه و رسیدن تراز بستر ماسه به عمق موردنظر قرارگیری لبه، لبه‌ی پی در مرکز جعبه و به‌صورت قائم برروی بستر ماسه قرار گرفته و بارش ماسه درون و اطراف لبه تا رسیدن ارتفاع ماسه به تراز سطح فوقانی لبه ادامه یافت. سپس فونداسیون سطحی برروی لبه قرار گرفت و توسط چهار عدد پیچ به لبه متصل شد. با تکمیل فرایند مدل‌سازی و استقرار مجموعه‌ی سیستم اندازه‌گیری و انتقال نیرو برروی مدل، بارگذاری توسط جک هیدرولیکی و از طریق میله‌ی مخصوص انجام و داده‌های خروجی توسط داده‌نگار ثبت شد. با افزایش دقت در مراحل مختلف مدل‌سازی، دست‌خوردگی نمونه‌ی ساخته شده، کمترین میزان محتمل را داشت. در فرایند انجام پژوهش، تعدادی از آزمایش‌ها نیز تکرار شد. مقایسه‌ی نتایج پاسخ بار- نشست آزمایش‌های تکرارشده و تطابق خوب نتایج با یکدیگر، نشان‌دهنده‌ی دقت فرایند مراحل مختلف مدل‌سازی فیزیکی بود.

مدل‌سازی عددی

باتوجه به اهمیت پژوهش و بررسی روند نتایج مدل‌های بزرگ‌مقیاس، علاوه‌بر مدل‌سازی فیزیکی، تعدادی تحلیل عددی نیز توسط نرم‌افزار پلکسیس انجام گرفت. براساس مشخصات هندسه و بارگذاری متقارن مدل‌های پی دایره‌ای (شرایط تقارن محوری)، مدل‌سازی عددی توسط تحلیل دوبعدی انجام شد. از المان‌های مثلثی پانزده‌گرهی برای مدل‌سازی مصالح ماسه و شش‌گرهی برای مصالح پی و لبه استفاده شد.

به‌منظور بارگذاری مدل‌های پی، روش متداول جابه‌جایی کنترل با اعمال جابه‌جایی سطحی یکنواخت به‌شکل گسترده و به‌میزان درصدی از قطر پی، به‌کار گرفته شد. جزئیات ابعاد شبکه‌ی المان و فواصل مرزهای قائم و افقی از پی و لبه در شکل (٦) مشاهده می‌شود. انتخاب فواصل مناسب مدل‌ها در شرایط مرزی، می‌تواند باعث کاهش اثرگذاری جداره و شکل مخزن بر نتایج مدل‌سازی شود. به‌منظور شبیه‌سازی رفتار تنش- کرنش مصالح، مدل‌های رفتاری الاستیک خطی و الاستوپلاستیک سخت‌شونده (Hardening Soil Model) به‌ترتیب برای پی و ماسه در نظر گرفته شد.

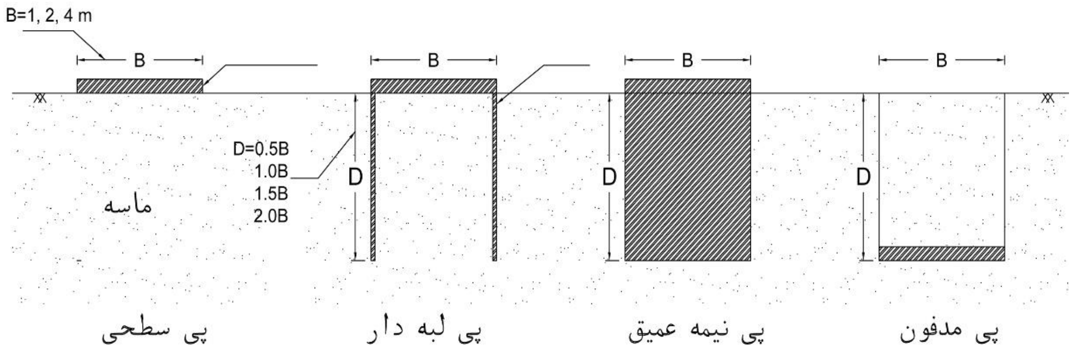


شکل ٦ جزئیات ابعاد شبکه‌ی المان و شرایط مرزی مدل‌سازی

مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح پی و ماسه به‌صورت پارامترهای مختلف شامل وزن مخصوص، مدول یانگ، نسبت پواسون، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، زاویه‌ی اتساع و ضریب کاهش مقاومت فصل مشترک در جدول (۳) ارائه شده‌است. به‌منظور عدم تأثیر میزان تغییرشکل مدل بر نتایج، مدل‌های پی به‌صورت کاملا صلب و فاقد تغییرشکل درنظر گرفته شد. در مدل‌سازی‌ها، سه نوع ماسه با دانسیته و زوایای اصطکاک داخلی و اتساع مختلف مطابق جدول (۳) مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر مدول یانگ (E_{50}) ماسه به‌ازای دانسیته‌های مختلف توسط دستگاه آزمایش سه‌محوری تعیین و به‌علت کم بودن عمق مؤثر پی، به‌صورت ثابت در عمق درنظر گرفته شد. هم‌چنین مقادیر زوایای اتساع خاک (ψ)، برحسب نتایج نمودارهای تغییر حجم آزمایش‌های سه‌محوری و برش مستقیم تعیین شد که با مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی ($\psi=\varphi-30°$) دارای انطباق خوبی است. مطابق اهداف پژوهش، علاوه‌بر انجام تحلیل عددی برروی مدل‌های کوچک‌مقیاس یکسان با ابعاد مدل‌های فیزیکی، تعدادی مدل با ابعاد بزرگ برابر با قطرهای ۱، ۲ و ٤ m نیز مدل‌سازی شد (شکل ۷). برای بارگذاری مدل‌های پی از روش جابه‌جایی کنترل و برای شبیه‌سازی میزان زبری سطوح فصل مشترک مدل‌های پی و ماسه، از ضرایب کاهش مقاومت ($R_{inter}=\tan\delta/\tan\varphi$: نسبت تانژانت زاویه‌ی اصطکاک سطوح زبر (δ) به تانژانت زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (φ) به‌دست‌آمده از آزمایش برش مستقیم) مطابق جدول (۳) استفاده شد.

جدول ۳ مشخصات مصالح و پارامترهای مورد استفاده در تحلیل عددی

پارامتر	مدل تنش – کرنش	وزن مخصوص (kN/m³)	نسبت پواسون	مدول یانگ E_{50} (kN/m²)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)	زاویه‌ی اتساع (درجه)	ضریب کاهش مقاومت فصل مشترک (R_{inter})
ماسه (سه دانسیته‌ی نسبی)	سخت شونده‌ی کرنشی	۱۵/۹ (R_d=0.5) ۱٦/۳ (R_d=0.64) ۱٦/٦ (R_d=0.75)	۰/۳	۱٦۰۰۰ ۲۱۰۰۰ ۲٤۰۰۰	۳۸ ٤۱ ٤۳	۸ ۱۱ ۱۳	–
پی سطحی و لبه (فولاد)	الاستیک خطی	۷۸	۰/۳	$۲/۱\times۱۰^{۸}$	–	–	۰/٦–۰/۹
پی نیمه‌عمیق و مدفون (بتن)	الاستیک خطی	۲۲	۰/۲	۲×۱۰^{۷}	–	–	۰/٦–۰/۹

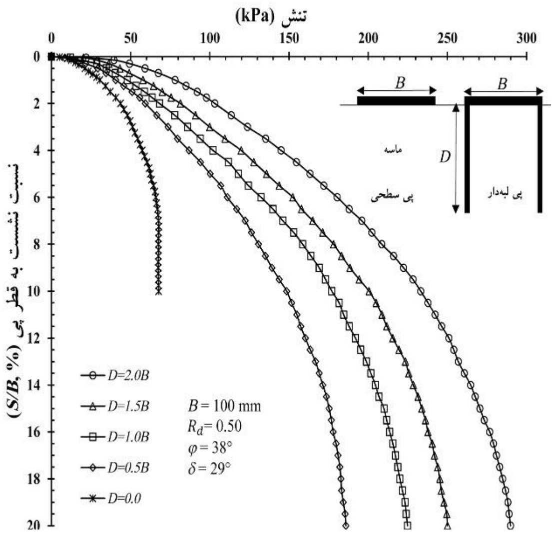


شکل ۷ جزئیات انواع پی‌های مورد مطالعه در تحلیل عددی

پی‌های نیمه‌عمیق پی‌هایی با حد وسط بین پی‌های سطحی و عمیق هستند که نسبت به پی‌های عمیق دارای قطرهای نسبتا بزرگ و عمق کمتر هستند (D/B<10). به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد پی‌های لبه‌دار با پی‌های نیمه‌عمیق (Semi-deep) و مدفون (Embedded) در تراز لبه، تعدادی مدل‌سازی با قطر و عمق مشابه انجام گردید و نتایج مقایسه شد. شکل (۷) جزئیات و ابعاد انواع پی‌های سطحی، لبه‌دار، نیمه‌عمیق و مدفون مورد مطالعه توسط تحلیل عددی را نشان می‌دهد.

نتایج مدل‌سازی‌ها

نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و شبیه‌سازی عددی جهت بررسی تأثیر وجود لبه زیر پی سطحی بر رفتار ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی به‌صورت پاسخ تنش- نشست، مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که استفاده از لبه، رفتار پی‌های سطحی را بهبود می‌بخشد و میزان بهبود با افزایش عمق لبه، افزایش می‌یابد. نتایج پی‌های لبه‌دار با مقادیر متناظر پی‌های نیمه‌عمیق و مدفون مقایسه شد. براساس روند مقایسه‌ی نتایج، عملکرد مناسب و خوب پی‌های لبه‌دار با اختلاف جزئی نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق مشاهده می‌شود. شکل (۸) نمونه‌ای از پاسخ‌های تنش- نشست را به‌ازای مدل‌سازی فیزیکی نشان می‌دهد. به‌منظور تعیین ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی کوچک‌مقیاس، از روش تقاطع مماس‌ها [36] استفاده شد. برای مدل‌های بزرگ‌مقیاس تحلیل عددی، باتوجه به عدم مشاهده‌ی تنش حداکثر در منحنی‌های پی لبه‌دار و به‌منظور مقایسه‌ی نتایج مدل‌های پی سطحی و لبه‌دار، ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی لبه‌دار به‌عنوان تنش متناظر با نسبت نشست به قطر پی (S/B) برابر با ۱۰٪ که تقریبا یکسان با مقادیر متناظر تنش‌های نهایی مشاهده‌شده برای پی‌های سطحی است، درنظر گرفته شد [37]. نتایج ظرفیت باربری نهایی انواع مدل‌های پی لبه‌دار، نیمه‌عمیق و مدفون براساس مدل‌سازی‌های فیزیکی و عددی در جداول (٤) و (٥) ارائه شده‌است.



شکل ۸ نمونه تیپ از منحنی‌های تنش- نشست مدل‌های پی

جدول ٤ مقادیر ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی لبه‌دار براساس مدل‌سازی فیزیکی

B	۱۰۰ mm					۷۵ mm					۵۰ mm
δ	۲۹°			۳٤°	۳۷°	۲۹°			۳٤°	۳۷°	۲۹°
R_d	۰/۵	۰/٦٤	۰/۷۵	۰/٦٤	۰/٦٤	۰/۵	۰/٦٤	۰/۷۵	۰/٦٤	۰/٦٤	۰/٦٤
D/B	q_{ult} (kPa)										
۰	۵۷	۷۲	۹۳	۷۷	۷۹	٤۸	۵٦	٦۷	٦۳	٦۷	٤٦
۰/۵	۱٦۰	۱۷٤	۲۱٤	۲۰۲	۲۲۲	۱۳۲	۱۵۰	۱۷۳	۱۷۵	۱۹۱	۱۰۹
۱	۱۹۵	۲۱۸	۲٦۲	۲٤٦	۲٦۸	۱۵۸	۱۸۵	۲۰۸	۲۲٦	۲٤۵	۱۳۸
۱/۵	۲۲۳	۲٤٦	۳۰۰	۲۸۰	۳۰۷	۱۷۹	۲۱۲	۲٤۲	۲۵۵	۲۷۹	۱٦۳
۲	۲٦۵	۳۰۱	۳٦۱	۳۳۵	۳٦۰	۲۰٦	۲٤۹	۲۷۷	۲۸۹	۳۱۸	۱۹۱

جدول ۵ مقادیر ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی لبه‌دار، نیمه‌عمیق و مدفون براساس تحلیل عددی

q_{ult} (kPa)	B =۱۰۰ mm, R_d = ۰/۵						B =۱۰۰ mm, R_d = ۰/۷۵					
	δ =۲۹°			δ =۳۷°			δ =۲۹°			δ =۳۷°		
D/B	لبه‌دار	نیمه‌عمیق	مدفون	لبه‌دار	نیمه‌عمیق	مدفون	لبه‌دار	نیمه‌عمیق	مدفون	لبه‌دار	نیمه‌عمیق	مدفون
۰/۵	۱٦۰	۱٦۹	۱٦۳	۱۷۱	۱۸٤	۱۷۲	۲۲۷	۲۳۸	۲۲۹	۲٦۵	۲۸۰	۲۵۱
۱	۱۹٦	۲۱۲	۱۹۸	۲۱۹	۲٤۱	۲۱۳	۲۷٦	۲۹٦	۲۹۵	۳۵٦	۳۸۱	۳۲۲
۱/۵	۲۳۰	۲۵۱	۲۳۳	۲٦۷	۲۹۲	۲۵۰	۳۲٦	۳۵۹	۳٤۳	٤۱۸	٤۵۰	۳۸۰
۲	۲۷٤	۲۹۹	۲۷۷	۳۱۱	۳٤۵	۲۸۳	۳۹۰	٤۳۲	٤۰۸	٤۹۸	۵٤۸	٤٤۳

q_{ult} (kPa)	B =۱۰۰ mm, R_d = ۰/٦٤								
	δ =۲۹°			δ =۳٤°			δ =۳۷°		
D/B	لبه‌دار	نیمه‌عمیق	مدفون	لبه‌دار	نیمه‌عمیق	مدفون	لبه‌دار	نیمه‌عمیق	مدفون
۰/۵	۱۸۱	۱۹۳	۱۸۷	۱۹۹	۲۰۸	۱۹۵	۲۲۰	۲۳۰	۲۱۱
۱	۲۲۷	۲٤۵	۲۳۱	۲۵۳	۲٦۸	۲٤۳	۲۸۱	۳۰٤	۲۵۷
۱/۵	۲٦۹	۲۹۲	۲۷۹	۲۹۵	۳۲۰	۲۸۲	۳۳۸	۳۷۲	۳۰۵
۲	۳۱۷	۳٤۳	۳۲۲	۳۵۷	۳۸٦	۳۳۷	٤۰۱	٤۳٦	۳۵۹

جهت کمی‌سازی عملکرد پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های سطحی، پارامترهای بی‌بعد نسبت ظرفیت باربری (Bearing capacity ratio (BCR)) و ضریب کاهش نشست (Settlement reduction factor (SRF)) به‌صورت حاصل تقسیم مقادیر ظرفیت باربری و نشست پی‌های لبه‌دار (q_{sk}, S_{sk})، به مقادیر متناظر پی‌های سطحی (q_{su}, S_{su})، مطابق رابطه‌ی (۲) تعریف شد. در محاسبات مربوط به نسبت نشست میان مدل‌های پی لبه‌دار و سطحی، مقادیر نشست پی‌ها در تراز تنش برابر با نصف ظرفیت باربری پی سطحی (۰/۵ q_{su})، مدنظر قرار گرفت.

هم‌چنین برای بررسی تأثیر لبه بر ضریب واکنش بستر، نسبت ضریب واکنش بستر (Subgrade Reaction

(Modulus Ratio (SRMR) مطابق رابطه‌ی (۲)، به‌صورت نسبت‌های ضریب واکنش بستر پی‌های لبه‌دار (k_{sk}) به مقادیر متناظر پی‌های سطحی (k_{su})، ارزیابی شد. قابل ذکر است که مقادیر ضریب واکنش بستر (k_s)، برای مدل‌های مختلف پی از نسبت تقسیم ظرفیت باربری (q) بر میزان نشست متناظر (s) به‌دست آمده‌است و به‌عنوان ضریب فنریت در مدل‌سازی پی‌ها و اندرکنش خاک- سازه استفاده می‌شود.

$$BCR = \frac{q_{sk}}{q_{su}}, SRF = \frac{S_{sk}}{S_{su}}, SRMR = \frac{k_{sk}}{k_{su}} \qquad (۲)$$

مجموعه‌ای از نمودارهای بدون بعد برحسب تغییرات نسبت ظرفیت باربری، نسبت نشست و نسبت ضریب واکنش بستر برای تخمین میزان ظرفیت باربری، نشست و ضریب واکنش بستر پی‌های لبه‌دار واقع بر ماسه تهیه و توسعه یافته‌است. باتوجه به این‌که زوایای اصطکاک داخلی ماسه معمولا بدون مشخص کردن محدوده‌ی تنش نرمال مؤثر مورد استفاده در آزمایش‌ها ارائه می‌شود، بنابراین در نمودارهای ارائه‌شده، به‌منظور انعکاس تأثیر مقاومت برشی ماسه، از مقادیر دانسیته‌های نسبی به‌جای زوایای اصطکاک داخلی ماسه استفاده شده‌است.

تحلیل، بحث و بررسی نتایج

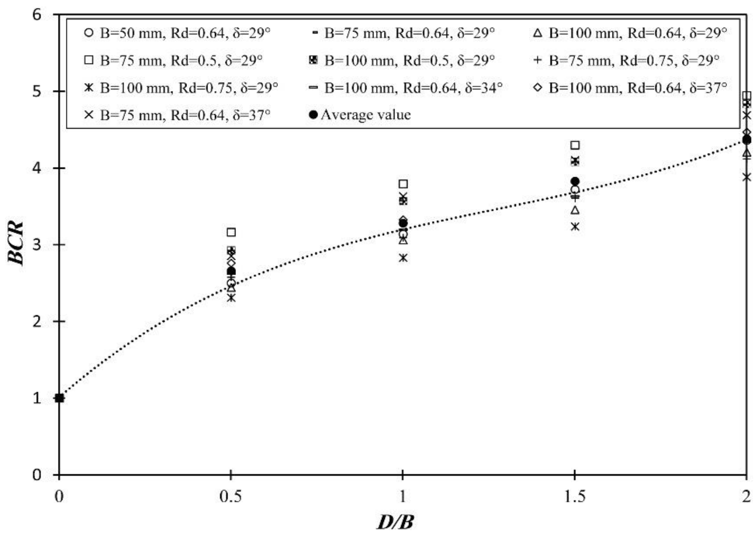
نتایج کلی تحلیل مدل‌های کوچک و بزرگ‌مقیاس پی‌های لبه‌دار، بیانگر افزایش قابل‌توجه ظرفیت باربری، کاهش نشست و بهبود ضریب واکنش بستر پی‌های سطحی ناشی از حضور لبه است. در این بخش تأثیر هر یک از پارامترهای نسبت عمق لبه، قطر پی، زبری سطوح لبه و دانسیته‌ی نسبی ماسه بر میزان بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار تحلیل شده‌است و میزان کارایی پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق و مدفون بررسی می‌شود.

بررسی تأثیر نسبت عمق لبه به قطر پی

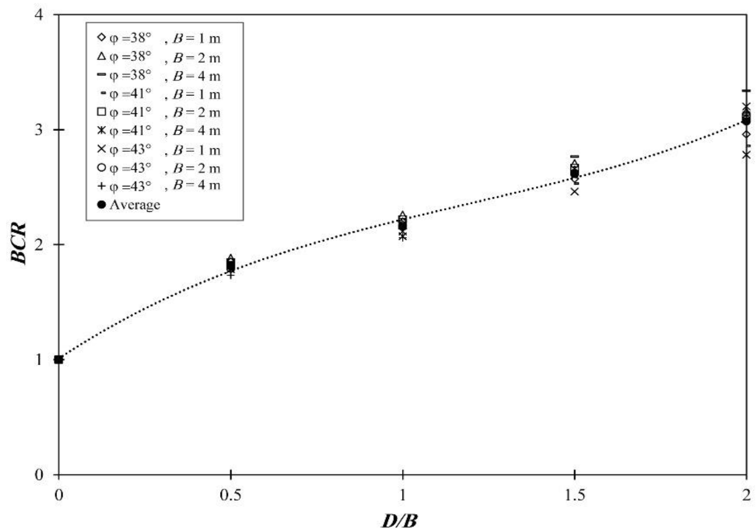
نسبت‌های مختلف عمق لبه به قطر پی (D/B)، به‌منظور بررسی اثر عمق لبه بر عملکرد پی‌های لبه‌دار مطالعه شد و نتایج با مقادیر متناظر پی‌های سطحی برحسب پارامترهای بی‌بعد BCR، SRF و SRMR مقایسه گردید.

نتایج نسبت ظرفیت باربری به‌ازای مدل‌های مختلف کوچک و بزرگ‌مقیاس در شکل (۹) ارائه شده‌است. ملاحظه می‌شود که به‌ازای همه‌ی مدل‌های پی با افزایش عمق لبه، مقادیر ظرفیت باربری به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته‌است. علی‌رغم تفاوت در شکل منحنی‌های تنش- نشست و مقادیر ظرفیت باربری نهایی مدل‌های کوچک و بزرگ‌مقیاس، روند کیفی مقادیر BCR یکسان مشاهده شد.

مقایسه‌ی کمی نتایج BCR نشان می‌دهد که مقادیر بهبود ظرفیت باربری مدل‌های بزرگ‌مقیاس، در محدوده‌ی ۱/۷۳ تا ۳/۳٤ است، درصورتی‌که مقادیر متناظر برای مدل‌های کوچک‌مقیاس در محدوده‌ی ۲/۳۱ تا ٤/۹۵ برابر است و این بیانگر میزان بهبود نسبتا کمتر مدل‌های بزرگ‌مقیاس نسبت‌به مدل‌های کوچک‌مقیاس است. دلیل اختلاف می‌تواند به تفاوت در منحنی‌های تنش- نشست و نوع روش تعیین ظرفیت باربری نهایی دو نوع مدل نسبت داده شود؛ میزان نسبت نشست متناظر با تنش نهایی در مدل‌های کوچک‌مقیاس تحلیل فیزیکی و عددی به‌طور متوسط حدود ١٤٪ مشاهده شد، درحالی‌که برای مدل‌های بزرگ‌مقیاس به‌دلیل عدم مشاهده‌ی تنش حداکثر، مقادیر ظرفیت باربری نهایی متناظر با نسبت‌های نشست ١٠٪ قطر پی درنظر گرفته شد. باتوجه به اختلاف در مقادیر نسبت تنش متناظر با ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی کوچک و بزرگ‌مقیاس و روند منحنی‌های تنش- نشست، وجود اختلاف در مقادیر BCR مدل‌های پی با ابعاد مختلف، بدیهی و توجیه‌پذیر است.



(الف)



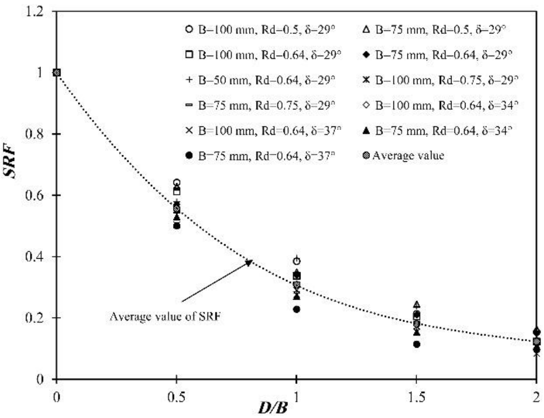
(ب)

شکل ۹ تغییرات نسبت ظرفیت باربری دربرابر نسبت عمق لبه: (الف) مدل‌های کوچک‌مقیاس، (ب) مدل‌های بزرگ‌مقیاس

باتوجه به محدودیت ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های نشست‌پذیر به‌دلیل نشست‌های بیش از حد، استفاده از لبه برای کاهش نشست می‌تواند مفید و کارآمد باشد. تأثیر حضور لبه بر میزان کاهش نشست مدل‌های پی سطحی برحسب تغییرات مقادیر *SRF*، در شکل (۱۰) ارائه شده‌است.

مشاهده می‌شود که وجود لبه، نشست پی سطحی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و میزان کاهش نشست با نسبت عمق D/B، دارای تناسب مستقیمی است. روند کاهش نشست به‌ازای همه‌ی پارامترها، علی‌رغم وجود اختلاف جزئی در مقادیر SRF، تقریبا مشابه است؛ به‌طوری‌که مقادیر ضریب کاهش نشست در محدوده‌ی ۰/۰۸ تا ۰/٦٤ به‌دست آمد. تحلیل نتایج نشان داد که با افزایش عمق لبه زیر مدل‌های پی، میزان نشست پی‌های سطحی به‌طور متوسط حداقل ٤٤٪ و حداکثر ۸۸٪ کاهش یافته‌است. میزان کارآمدی لبه‌ی زیر پی

سطحی علاوه‌بر افزایش ظرفیت باربری، در قابلیت کاهش نشست قابل‌توجه پی نیز به‌وضوح مشاهده می‌شود. به‌طوری‌که استفاده از پی‌های لبه‌دار در خاک‌های ضعیف، رفع محدودیت پی‌های سطحی را به‌لحاظ ملزومات باربری و نشست توجیه می‌کند.



شکل ۱۰ تغییرات ضریب کاهش نشست دربرابر عمق لبه

برپایه‌ی افزایش میزان ظرفیت باربری و کاهش نشست پی‌های سطحی ناشی از لبه و هم‌چنین وجود رابطه‌ی تئوری میان ظرفیت باربری، نشست و ضریب واکنش بستر؛ تغییرات مقادیر نسبت ضریب واکنش بستر SRMR، به‌دست آمد. نتایج نشان داد که ضریب واکنش بستر مدل‌های پی لبه‌دار متناسب با افزایش نسبت عمق لبه و نسبت نشست، به‌میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که صرف‌نظر از پارامترهای مختلف و به‌ازای نسبت‌های نشست تا ۲۰٪، مقادیر بهبود در محدوده‌ی ۱/۸ تا ۵/۲ برابر مقادیر متناظر پی‌های سطحی به‌دست آمده‌است.

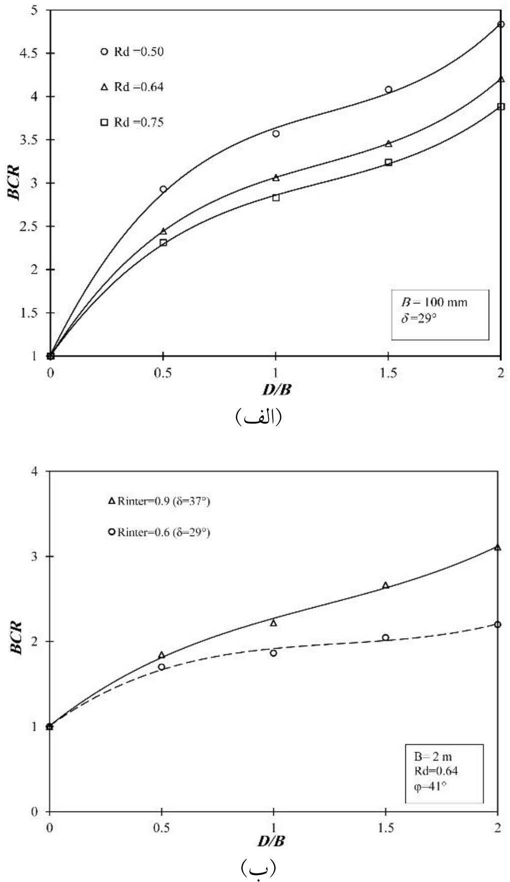
بررسی تأثیر دانسیته‌ی نسبی ماسه و زبری سطوح لبه

دانسیته‌ی خاک یکی از پارامترهایی است که معمولا در میزان ظرفیت باربری و نشست پی‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کند. به‌همین منظور برای ارزیابی اثر دانسیته‌ی نسبی ماسه، تأثیر سه نوع دانسیته‌ی نسبی ۵۰٪، ٦٤٪ و ۷۵٪ بر عملکرد پی لبه‌دار بررسی شد.

تغییرات نسبت ظرفیت باربری برحسب دانسیته‌ی نسبی در شکل (۱۱-الف) ارائه شده‌است. از روند نتایج مشاهده می‌شود که کارآمدی و تأثیر حضور لبه در زیر پی‌های واقع بر ماسه با دانسیته‌ی نسبی کمتر، بیشتر است؛ به‌عبارت دیگر، بهبود در مقادیر BCR با کاهش دانسیته‌ی نسبی ماسه افزایش می‌یابد. تحلیل نتایج نشان داد که مقادیر بهبود ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار به‌ازای دانسیته‌ی نسبی ۵۰٪ نسبت به مقدار ۷۵٪، به‌طور متوسط حدود ٢٤٪ افزایش دارد که بیانگر پتانسیل بیشتر بهبود عملکرد لبه در خاک ماسه‌ای با تراکم سست تا متوسط است.

بررسی تأثیر دانسیته‌ی نسبی بر مقادیر کاهش نشست برحسب ضریب کاهش نشست نشان می‌دهد که میزان کاهش نشست متناسب با دانسیته‌ی نسبی ماسه است و با افزایش مقدار دانسیته، مقادیر SRF کاهش بیشتری دارد. به‌طور نمونه، با افزایش دانسیته‌ی نسبی از مقدار ۵۰٪ به ۷۵٪، مقادیر SRF به‌طور متوسط حدود ٢٦٪ بهبود داشته و باعث کاهش بیشتر نشست مدل‌های پی لبه‌دار نسبت به پی سطحی شده‌است.

به‌منظور ارزیابی میزان تأثیر زبری سطوح پی و لبه بر عملکرد و کارآمدی پی‌های لبه‌دار و مقایسه با مصالح بتن مورد استفاده در عملیات اجرایی پی‌ها، سه میزان زبری متفاوت، برحسب زاویه‌ی اصطکاک فصل مشترک (δ) برابر با °۲۹، °٣٤، °۳۷ به‌ازای مدل‌سازی‌های فیزیکی و ضریب کاهش مقاومت R_{inter}=۰/٦-۰/۹ برای تحلیل عددی درنظر گرفته شد. شکل (۱۱-ب) تغییرات مقادیر BCR را به‌ازای زبری‌های مختلف نشان می‌دهد که بیانگر بهبود عملکرد پی‌های لبه‌دار از نظر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست، با افزایش میزان زبری سطوح تماس پی با ماسه است؛ براساس تحلیل نتایج، متوسط بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست با افزایش زبری سطوح نسبت به حالت صاف، به‌ترتیب حدود ۱۱٪ و ۲۹٪ به‌دست آمد.

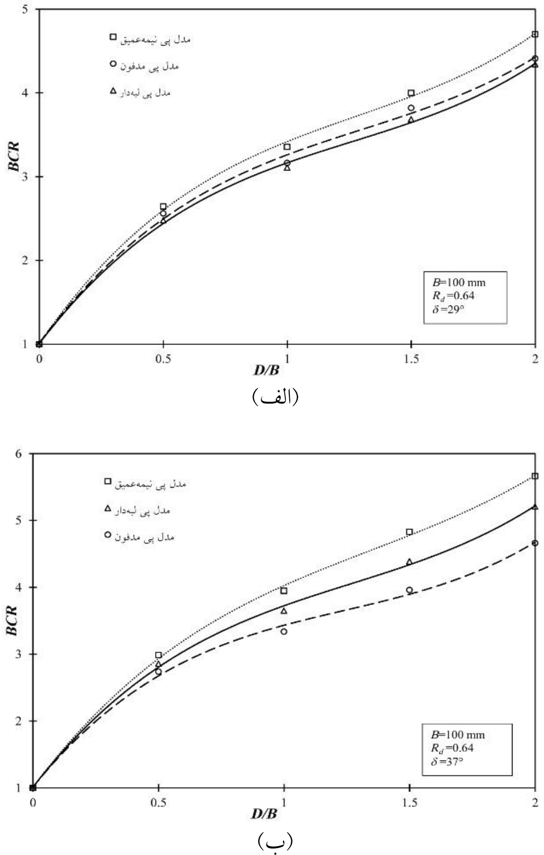


شکل ۱۱ تغییرات نسبت ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار: (الف) تأثیر دانسیته‌ی نسبی ماسه، (ب) تأثیر میزان زبری سطوح

مقایسه‌ی رفتار پی‌های لبه‌دار با نیمه‌عمیق و مدفون

یکی از اهداف اصلی این پژوهش، مقایسه‌ی عملکرد پی‌های لبه‌دار نسبت به سایر انواع پی‌های سطحی، نیمه‌عمیق و مدفون است. به‌منظور ارزیابی میزان کارایی پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق، نتایج آزمایشگاهی مدل‌های پی لبه‌دار به‌لحاظ ظرفیت باربری با نتایج متناظر روابط نظری پی‌های نیمه‌عمیق و هم‌چنین نتایج مدل‌سازی عددی مقایسه شد. برای تخمین مقادیر ظرفیت باربری پی‌های نیمه‌عمیق از روابط پیشنهادی محققان مختلف برای این نوع پی‌ها [8, 38-40]، استفاده شد و با نتایج متناظر مدل‌های فیزیکی پی‌های لبه‌دار مورد مقایسه قرار گرفت. ارزیابی نتایج نشان داد که مقادیر ظرفیت باربری پی‌های نیمه‌عمیق با عمق و قطر یکسان، به‌طور متوسط بین ۱۰٪ تا ۱۵٪ بیشتر از پی‌های لبه‌دار است.

مقایسه‌ی نتایج BCR به‌دست‌آمده از تحلیل عددی به‌ازای مدل‌های پی لبه‌دار و نیمه‌عمیق در شکل (۱۲) ارائه شده‌است. ملاحظه می‌شود که مقادیر ظرفیت باربری نهایی پی‌های نیمه‌عمیق به‌طور متوسط حدود ۷/۵٪ بیشتر از مقادیر پی‌های لبه‌دار به‌دست آمده‌است که بیانگر عملکرد نزدیک پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های نیمه‌عمیق است. در تفسیر عملکرد نزدیک پی‌های لبه‌دار و نیمه‌عمیق می‌توان گفت که با محصورسازی جانبی ماسه توسط لبه و افزایش عمق مؤثر پی، مکانیزم گسیختگی سطحی پی‌های سطحی متناسب با افزایش عمق لبه، عمیق‌تر می‌شود و همانند پی‌های نیمه‌عمیق، بار در تراز نوک لبه به خاک انتقال داده می‌شود.



شکل ۱۲ مقایسه‌ی تغییرات نسبت ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار، نیمه‌عمیق و مدفون: الف) δ=29°، ب) δ=37°

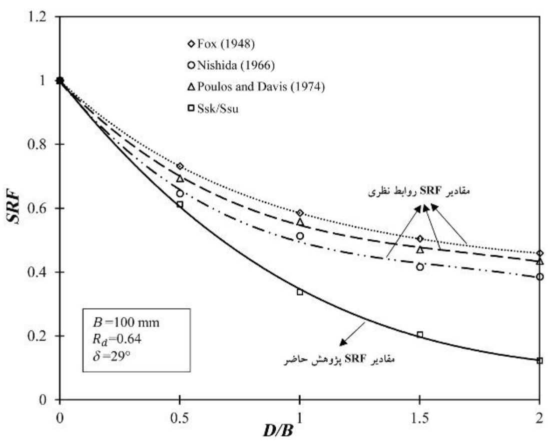
باوجود این‌که یکی از روش‌های متداول جهت

بهبود ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی، افزایش سربار از طریق افزایش عمق مدفون پی‌ها است، با این حال به‌علت محدودیت‌های اجرایی هم‌چون نیاز به گودبرداری، استفاده از لبه در زیر پی‌های سطحی به‌عنوان جایگزین پی‌های مدفون اهمیت بیشتری یافته‌است. بنابراین مقایسه‌ی عملکرد دو نوع پی می‌تواند میزان کارآمدی پی‌های لبه‌دار را نسبت‌به پی‌های سطحی مدفون مشخص نماید.

نتایج BCR پی‌های لبه‌دار و سطحی مدفون در تراز لبه، مطابق شکل (۱۲) مقایسه شده‌است. مشاهده می‌شود که علی‌رغم مشابهت روند منحنی‌ها، مقادیر ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار نسبت‌به پی مدفون برحسب میزان زبری سطوح مدل‌ها متغیر است. مقایسه‌ی کمی نتایج نشان داد که مقادیر ظرفیت باربری مدل‌های پی لبه‌دار با سطوح زبری بیشتر، به‌طور متوسط حدود ٪۸ بیشتر از مقادیر متناظر پی‌های مدفون است که عملکرد خوب و قابل‌قبول پی‌های لبه‌دار با سطوح زبر را نسبت‌به پی‌های مدفون منعکس می‌کند.

برای مدل‌های با سطوح صاف، ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار حدود ٪۲/۵ کمتر از مقادیر متناظر پی‌های مدفون به‌دست آمد. میزان اختلاف در نتایج باربری دو نوع مدل پی، با افزایش میزان زبری سطوح پی، دانسیته‌ی نسبی ماسه و نسبت عمق لبه به قطر پی افزایش می‌یابد، بنابراین می‌توان اذعان نمود که عملکرد پی‌های لبه‌دار درمقایسه با پی‌های مدفون، به‌مقدار زیادی وابسته به میزان زبری سطوح لبه است؛ با افزایش زبری، میزان باربری پی‌های لبه‌دار نسبت به پی‌های مدفون بهتر می‌شود و با کاهش زبری، باربری کاهش می‌یابد.

باتوجه به نتایج کاهش مقادیر نشست پی‌های سطحی ناشی از وجود لبه در زیر پی، عملکرد مدل‌های پی لبه‌دار از نظر پتانسیل میزان کاهش نشست نسبت‌به پی مدفون در تراز متناظر با نوک لبه، بررسی و مقایسه شد؛ مقادیر نشست مدل‌های پی لبه‌دار برحسب ضریب کاهش نشست، با مقادیر نشست پی سطحی مدفون در اعماق متناظر با نسبت عمق D/B، از طریق ضرایب اصلاحی نشست پیشنهادشده توسط محققان مختلف [41-43]، مطابق شکل (۱۳) مقایسه شد.



شکل ۱۳ مقایسه‌ی ضریب کاهش نشست پی‌های لبه‌دار و سطحی مدفون برپایه‌ی نتایج مدل‌سازی فیزیکی و روابط نظری

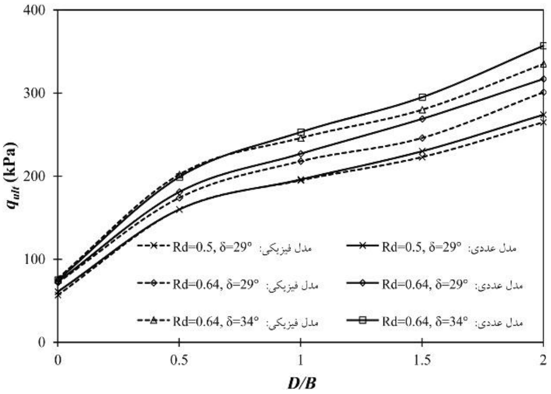
از روند منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که پی‌های لبه‌دار به‌ازای همه‌ی نسبت‌های عمق لبه، مقادیر نشست پی‌های سطحی را نسبت‌به پی‌های مدفون، بیشتر کاهش می‌دهند. اختلاف میزان کاهش نشست برای دو نوع پی، به‌ازای نسبت‌های کمتر عمق لبه، حداقل میزان بوده و با افزایش عمق لبه، عملکرد لبه در قابلیت کاهش نشست بهتر شده‌است؛ بنابراین استفاده از لبه در زیر پی‌های سطحی که منجر به افزایش عمق مؤثر پی می‌شود، درمقایسه با افزایش عمق مدفون پی دارای عملکرد بهتری به‌لحاظ کاهش نشست است که بیانگر سودمندی و مزیت پی‌های لبه‌دار در میزان کاهش نشست نسبت‌به پی‌های سطحی مدفون است.

در حالت کلی، پی‌های لبه‌دار درمقایسه با پی‌های نیمه‌عمیق و سطحی مدفون، به‌لحاظ افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست دارای عملکرد خوبی هستند.

مقایسه‌ی نتایج

به‌منظور بررسی صحت و دقت نتایج آزمایش‌های مدل

فیزیکی و تحلیل عددی و هم‌چنین بررسی میزان تطابق نتایج، ظرفیت باربری نهایی مدل‌های پی کوچک‌مقیاس اندازه‌گیری‌شده توسط مدل‌سازی فیزیکی و عددی، مطابق شکل (١٤) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که روند منحنی‌ها و مقادیر کمی ظرفیت باربری با اختلاف جزئی و ناچیز، دارای تطابق قابل‌قبول و خوبی هستند. براساس مقایسه‌ی نتایج، میزان ظرفیت باربری نهایی تحلیل عددی به‌طور متوسط حدود ٤٪ بیشتر از مقادیر متناظر مدل‌های آزمایشگاهی به‌دست آمد.



شکل ١٤ مقایسه‌ی ظرفیت باربری نهایی مدل‌های کوچک‌مقیاس پی لبه‌دار اندازه‌گیری‌شده توسط مدل‌سازی فیزیکی و عددی

هم‌چنین مقایسه‌ی نتایج نسبت ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار در این پژوهش با نتایج متناظر مطالعات مشابه، وجود تفاوت‌هایی در مقادیر بهبود ظرفیت باربری ناشی از حضور لبه در زیر پی سطحی را نشان داد؛ به‌عنوان نمونه، براساس نتایج انجام آزمایش فیزیکی برروی مدل‌های پی به‌قطر ۷/۵ cm و لبه‌ی استوانه‌ای از جنس پلیمر واقع بر بستر ماسه با دانسیته‌ی نسبی ٧٦٪ [18]، مقدار بهبود نسبت ظرفیت باربری را به‌ازای نسبت عمق ۲، حدود ۱۰ گزارش داده‌است که به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده در این تحقیق است.

براساس مدل‌سازی فیزیکی و عددی انجام‌گرفته در مطالعه مشابه دیگری، میزان بهبود در مقادیر ظرفیت باربری برای مدل‌های پی مربعی به‌عرض ۱۲ cm و دانسیته‌ی نسبی ماسه ٤٤٪، در حدود ۲/۲ تا ٥/٦ به‌دست آمده‌است [21–22]. هم‌چنین ارزیابی و مطالعه‌ی رفتار مدل‌های پی مربعی به‌عرض ۱۰ cm واقع بر ماسه با دانسیته‌ی نسبی ٦٤٪ توسط مدل‌سازی فیزیکی، افزایش مقادیر ظرفیت باربری را در محدوده‌ی ۱/٤۱ تا ٤/٦٤ نشان داد [14].

باتوجه به روند نتایج می‌توان گفت که دلایل اختلاف موجود در نتایج، نیاز به بررسی و تحقیق بیشتری دارد؛ با این وجود، اختلاف در نتایج گزارش‌شده می‌تواند به تفاوت‌های موجود در شرایط انجام آزمایش‌ها، ابعاد مدل‌های پی، مقادیر پارامترها و جنس مصالح مورد استفاده برای مدل‌ها نسبت داده شود. به‌عنوان نمونه، جنس مصالح مورد استفاده برای مدل پی و لبه، توسط محققان مختلف متفاوت است و یکسان نیست که این موضوع منجر به تفاوت در صلبیت مدل‌ها و تناقض در نتایج تنش- نشست پی‌ها می‌شود. هم‌چنین تفاوت در دانسیته‌ی نسبی ماسه، زبری سطوح مدل‌ها و نوع روش تعیین مقادیر ظرفیت باربری نهایی، می‌تواند از دیگر دلایل اختلاف در نتایج مطالعه‌های مشابه باشد. به‌طور کلی، دلایل واقعی اختلاف نتایج محققان مختلف و هم‌چنین میزان سهم هرکدام از علل مذکور، نیاز به تحقیق و بررسی بیشتر و جامع‌تری دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مجموعه‌ای از آزمایش‌های فیزیکی و تحلیل‌های عددی به‌منظور مطالعه‌ی تأثیر وجود لبه در زیر پی‌های سطحی به‌لحاظ میزان بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست، انجام شد. تأثیر پارامترهای مختلف قطر پی، نسبت عمق لبه به قطر پی، میزان زبری سطوح مدل و دانسیته‌ی نسبی خاک بر رفتار پی‌های لبه‌دار بررسی شد. از مهم‌ترین نتایج پژوهش، می‌توان به‌طور خلاصه به موارد ذیل اشاره نمود؛

۱. محصورسازی جانبی ماسه ناشی از حضور لبه پیرامون پی سطحی، باعث افزایش مقادیر ظرفیت باربری پی

می‌شود. بسته به پارامترهای مختلف، نسبت ظرفیت باربری به‌ازای مدل‌های فیزیکی کوچک‌مقیاس در محدوده‌ی ۲/۳۱ تا ۴/۹۵ به‌دست آمد.

۲. وجود لبه پیرامون پی سطحی، پاسخ تنش- نشست را تغییر می‌دهد و همراه با افزایش مقادیر ظرفیت باربری، نشست پی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. حداکثر کاهش نشست در حدود ۹۲٪ به‌دست آمد.

۳. استفاده از لبه، ضریب واکنش بستر مدل‌های پی سطحی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه را متناسب با افزایش نسبت نشست، افزایش می‌دهد.

۴. بهبود در نسبت ظرفیت باربری با کاهش دانسیته‌ی نسبی ماسه افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، بیشترین کارایی پی‌های لبه‌دار از نظر بهبود ظرفیت باربری، در خاک‌های ماسه‌ای سست و با تراکم متوسط حاصل شد.

۵. مقادیر بهبود رفتار پی های لبه‌دار، با افزایش میزان زبری سطوح پی و لبه، افزایش می‌یابد.

۶. براساس مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی مدل‌های پی لبه‌دار و پی نیمه‌عمیق، مقادیر ظرفیت باربری نهایی پی های لبه‌دار نزدیک به مقادیر متناظر پی های نیمه‌عمیق مشاهده شد.

۷. عملکرد پی‌های لبه‌دار درمقایسه با پی‌های مدفون، به‌مقدار زیادی وابسته به میزان زبری سطوح لبه است؛ با افزایش زبری سطوح، میزان ظرفیت باربری پی‌های لبه‌دار نسبت‌به پی‌های مدفون افزایش، و با کاهش زبری، کاهش می‌یابد.

۸. مقایسه‌ی نتایج مدل‌های پی لبه‌دار با نتایج متناظر پی‌های نیمه‌عمیق و مدفون نشان داد که لبه با انتقال بارهای سازه به اعماق پایین‌تر و بهبود عملکرد باربری و نشست، می‌تواند به‌عنوان روش مناسب درجهت تقویت و به‌سازی پی درنظر گرفته شود.

مراجع

1. Binquet, J., and Lee, K. L., "Bearing Capacity Aanalysis of Reinforced Earth Slabs", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 101, Pp. 201–224, (1975).
2. Consoli, N.C., Prietto, P.D., and Ulbrich, L.A., "Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 12, Pp. 1211-1214, (1998).
3. Dash, S., Rajagopal, K., and Krishnaswamy, N., "Performance of Different Geosynthetic Reinforcement Materials in Sand Foundations", *Geosynthetics International*, Vol. 11, No. 1, Pp. 35-42, (2004).
4. Mayne, P.W., Jones, J.S., and Dumas, J.C., "Ground Response to Dynamic Compaction", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 6, Pp. 757-774, (1984).
5. Zadroga, B., "Bearing Capacity of Shallow Foundations on Noncohesive Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 11, Pp. 1991-2008, (1994).
6. Eslami, A., and Fellenius, B.H., "Pile Capacity by Direct CPT and CPTu Methods Applied to 102 Case Histories", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, No. 6, Pp. 886-904, (1997).
7. Eslami, A., Valikhah, F., Veiskarami, M., and Salehi, M., "CPT-Based Investigation for Pile Toe and Shaft Resistances Distribution", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 35, No. 6, Pp. 2891-

2905, (2017).

8. Meyerhof, G. G., "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, No. 1, Pp. 16-26, (1963).
9. Vesic, A. B., "Bearing Capacity of Deep Foundations in Sand", *Highway Research Record*, Vol. 39, Pp. 112-53, (1963).
10. Gourvenec, S., and Randolph, M. F., "Consolidation Beneath Circular Skirted Foundations", *International Journal of Geomechanics,* Vol. 10, No. 1, Pp. 22-29, (2010).
11. Rezazadeh, S., and Eslami, A., "Bearing Capacity of Semi-deep Skirted Foundations on Clay Using Stress Characteristics and Finite Element Analyses", *Marine Georesources & Geotechnology,* Vol. 36, No. 6, Pp. 625-639, (2018).
12. Esmaeili, K., Eslami, A., and Rezazadeh, S., "Semi-deep Skirted Foundations and Numerical Solution to Evaluate Bearing Capacity", *Open Journal of Geology,* Vol. 8, Pp. 623-640, (2018).
13. Yun, G., and Bransby, M., "The Undrained Vertical Bearing Capacity of Skirted Foundations", *Soils and Foundations,* Vol. 47, No. 3, Pp. 493-505, (2007).
14. Al-Aghbari, M., and Dutta, R., "Performance of Square Footing with Structural Skirt Resting on Sand", *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal,* Vol. 3, No. 4, Pp. 271-277, (2008).
15. Al-Aghbari, M., and Mohamedzein, Y. E., "Bearing Capacity of Strip Foundations with Structural Skirts", *Geotechnical & Geological Engineering,* Vol. 22, No. 1, Pp. 43–57, (2004).
16. Al-Aghbari, M., and Mohamedzein, Y. E., "Improving the Performance of Circular Foundations Using Structural Skirts", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement,* Vol. 10, No. 3, Pp. 125-132, (2006).
17. Villalobos, F., "Bearing Capacity of Skirted Foundations in Sand", in: *VI Congreso Chileno de Geotecnia*, SOCHIGE,Valparaiso, Pp. 1-14, (2007).
18. El Sawwaf, M., and Nazer, A., "Behavior of Circular Footings Resting on Confined Granular Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 131, No. 3, Pp. 359-366, (2005).
19. Golmoghani-Ebrahimi, S., and Rowshanzamir, M., "Experimental Evaluation of Bearing Capacity of Skirted Footings", *Civil Engineering and Architecture,* Vol. 1, No. 4, Pp. 103-108, (2013).
20. Elsaied, A.E., Saleh, N. M., and Elmashad, M.E., "Behavior of Circular Footing Resting on Laterally Confined Granular Reinforced Soil", *HBRC Journal,* Vol. 11, No. 2, Pp. 240-245, (2015).
21. Eid, H. T., "Bearing Capacity and Settlement of Skirted Shallow Foundations on Sand", *International Journal of Geomechanics,* Vol. 13, No. 5, Pp. 645-652, (2012).
22. Eid, H. T., Alansari, O. A., Odeh, A. M., Nasr, M. N., and Sadek, H.A., "Comparative Study on the Behavior of Square Foundations Resting on Confined Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 4, Pp. 438-453, (2009).

23. Gholipour, S., and Makarchian, M., "Study of the Behaviour of Skirted Shallow Foundations Resting on Sand", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,* Vol. 18, No. 3, Pp. 117-130, (2018).
24. Azzam, W., and Farouk, A., "Experimental and Numerical Studies of Sand Slopes Loaded with Skirted Strip Footing", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering,* Vol. 15, No. 1, Pp. 795-812, (2010).
25. Bransby, M., and Yun, G. J., "The Undrained Capacity of Skirted Strip Foundations under Combined Loading", *Géotechnique,* Vol. 59, No. 2, Pp. 115-125, (2009).
26. Mana, D. S., Gourvenec, S., and Martin, C. M., "Critical Skirt Spacing for Shallow Foundations under General Loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 139, No. 9, Pp. 1554-1566, (2009).
27. Das, B. M., "*Principles of Foundation Engineering*", 6th Edition, Thomson, Canada, 445P. (2007).
28. Dean, E. T. R., "*Offshore Geotechnical Engineering: Principles and Practice*", Published by Thomas Telford Limited, London, UK, (2010).
29. Cerato, A., and Lutenegger, A., "Bearing Capacity of Square and Circular Footings on a Finite Layer of Granular Soil Underlain by a Rigid Base", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 132, No. 11, Pp. 1496-1501, (2006).
30. Pfeifle, T. W., and Das, B. M., "Model Tests for Bearing Capacity in Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 105, Pp. 1112-1116, (1979).
31. Chen, Q., "*An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation*", PHD Thesis, Louisiana State University, (2007).
32. ASTM Standard, D2487, "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2006).
33. Butterfield, R., and Andrawes, K., "An Air Activated Sand Spreader for Forming Uniform Sand Beds", *Geotechnique,* Vol. 20, No. 1, Pp. 97-100, (1970).
34. Rad, N. S., and Tumay, M. T., "Factors Affecting Sand Specimen Preparation by Raining", *Geotechnical Testing Journal,* Vol. 10, No. 1, Pp. 31-37, (1987).
35. Walker, B., and Whitaker, T., "An Apparatus for Forming Uniform Beds of Sand for Model Foundation Tests", *Geotechnique,* Vol. 17, No. 2, Pp. 161-167, (1987).
36. Fellenius, B. H., "The Analysis of Results from Routine Pile Load Tests", *Ground Engineering,* Vol. 13, No. 6, Pp. 19-31, (1980).
37. Winterkorn, H. F., and Fang, H. Y., "*Foundation Engineering Handbook*", New York Van Nostrand Reinhold, Edition 1, Chapter 3, Pp. 121-147, (1975).
38. Terzaghi, K., "*Theoretical Soil Mechanics*", John Wiley & Sons, New York, 510P., (1943).
39. Hansen, J. B., "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity", Danish Geotechnical Institute,

Bulletin No. 28, Copenhagen, pp. 5–11, (1970).

40. Janbu, N., "Static Bearing Capacity of Friction Piles", *in: 6th European Conference on SMFE,* Vol.. 1.2, Pp. 479-88, (1976).
41. Poulos, H. G., and Davis, E. H., "*Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*", John Wiley & Sons, New York, 411P., (1974).
42. Fox, L., "The Mean Elastic Settlement of a Uniformly Loaded Area at a Depth Below the Ground Surface", *in: Proceedings of 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*,Vol.1, Pp. 129-132, (1948).
43. Nishida, Y., "Vertical Stress and Vertical Deformation of Ground under a Deep Circular Uniform Pressure in the Semi-infinite", in: *1st ISRM Congress*, (1966).